



THEME 04

실내 공기질 개선을 위한 나노/바이오 에어로졸 입자측정 및 저감기술

황정호 | 연세대학교 기계공학과 교수 | e-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

현대 사회에서 웰빙에 관심이 높아짐에 따라 실내 공기질에 대한 관심도 커졌으며 그 시장 또한 커지고 있다. 쾌적한 실내 공기질 확보를 위해서 오염 물질을 기계적으로 측정하고, 저감할 수 있는 연구가 중요하다.

최근 건축물의 고기밀화, 고단열화로 구조가 변경되며 신선한 외기 도입의 감소로 실내 공기질이 악화되고 있다. 현대인의 경우 생활의 대부분을 실내에서 보내고 있어 실내 공기질의 악화는 발암, 알레르기, 피로감 등 각종 질병을 초래할 수 있다. 실내의 주요 오염 물질로는 바이오에어로졸(bioaerosol), 휘발성 유기 화합물(VOCs: Volatile organic compounds), 미세 먼지(나노입자)가 있으며, 쾌적한 실내 공기질 확보를 위해서 위 열거된 오염 물질을 기계적으로 측정하고, 저감할 수 있는 연구가 활발히 진행되고 있다. 나노 및 바이오 입자를 측정하는 대표적인 기술로는 중력 침강 설계를 이용한 임팩터 기술, 입자의 하전과 포집 및 포집된 입자의 전류 측정을 이용하는 기술, 광산란을 이용해 먼지의 크기 및 농도를 측정하는 기술 등이 있으며, 저감 기술로는 항균 물질 코팅 기술, 공기 이온을 이용한 항균 기술 등이 있다. 본 내용에는 위 기술을 포함한 나노/바이오 입자 측정 및 저감 기술을 소개하고자 한다.

나노/바이오 에어로졸 입자 측정기술

미세입자를 측정할 때에는 입자의 질량농도, 수농도, 크기 분포 등 많은 기준이 있어 상황에 맞는 측정 방법이 필요하며, 측정하는 대상의 입자의 크기에 따라 다양한 기기가 존재하기 때문에 입자 측정장비를

목적에 맞게 사용하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 수농도를 측정하는 데 주로 사용되는 방법은 광학식과 공기역학적 방식이 있는데 이들은 마이크로미터 단위의 입자 적용이 용이하나 나노입자의 측정에서 자주 사용되지 못한다.

이러한 1 μ m 이하의 미세입자를 측정하는 데 기준이 되는 측정장비는 입자의 크기를 분류해주는 DMA(Differential Mobility Analyzer)와 입자의 개수를 측정하는 CPC(Condensation Particle Counter)가 조합된 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer)를 이용한다. 입자의 수농도와 그 분포를 보여주며 가장 널리 사용되고 있으나 측정을 위해 수 분이 걸리며 장비가 커 휴대성이 낮다는 단점이 있다.

SMPS의 느린 응답속도를 개선하기 위하여 전기적인 방법이 주로 사용되는데, 미국의 TSI, 핀란드의 데카티(Dekati)와 같은 에어로졸 측정기기 제작업체에서는 FMPS(Fast Mobility Particle Sizer), ELPI(Electrical Low-Pressure Impactor)와 같은 장비를 개발하였다. 이들은 코로나 방전을 이용하여 입자를 하전시키고 FMPS는 내부에 있는 고전압 전극에 의한 전기력을, ELPI는 저압 임팩터를 이용하여 입자를 전극에 부착시켜 부착된 전극에 있는 전류계를 이용하여 입자의 수농도를 측정하는 방식이다. 수농도와 그 분포를 확인할 수 있으며, 수 초 내외의 빠른 응답속도를 통해 실시간으로 변하는 입자의 수농도를 확인할 수

있지만 부피가 커 주거공간, 사무공간에서 실시간으로 측정하기에는 부적합하다.

소형 센서의 개발은 최근 무선 통신 기술의 발달로 인하여 그 중요성이 커지고 있다. 무선 기술의 발전은 건물 내 각 공간에서의 유해 입자 측정이 가능하도록 했으며, 스마트폰의 발전은 이를 실시간으로 측정하여 사용자에게 알려주는 유비쿼터스 센서 네트워크의 실현 가능성을 높여주었다. 이를 위하여 필요한 것은 저렴하지만 정확도가 높은 센서의 개발이다. 현재 상용화된 소형 센서는 광학적 방식이 대부분이며, 최근 전기적 방식에 의한 측정기도 개발되고 있다. 전기적 방식으로 측정하기 위해서는 입자를 하전시키는 하전기와 하전된 입자를 측정하는 측정기가 필요하다. 현재 나노입자의 경우 입자당 하전량이 1이 되지 않는 부분 하전이 일어나기 때문에 하전량을 높이려는 연구가 진행 중이며, 측정기의 감도를 높이는 연구 또한 진행 중이다.

바이오에어로졸은 생물학적 기원을 갖는 공기 중 부유 입자상 물질을 의미하는 것으로 바이러스, 세균, 진균(곰팡이) 등의 미생물 기원과 꽃가루, 이끼 등의 식물 기원, 그리고 미세 무척추 동물과 미세 곤충을 포함한 동물성 기원으로 구분된다. 다양한 크기 분포와 다양한 기원을 가진 바이오에어로졸 입자 측정 기술은 군사 기관과 환경 모니터링 분야에서 시발점으로 연구가 진행되었으며, 일반적으로 관성, 충돌, 필터 포집 방식을 이용해 측정되었다. 대표적으로 앤더슨 임팩터와 같은 바이오 입자 포집기에 바이오 입자를 포집 후 하루 또는 그 이상 배양을 거쳐 형성된 균집수를 측정하여 바이오 입자의 유/무를 판단하는 균집체 계수법을 사용하고 있다. 바이러스의 경우, 미생물이 증식된 배지에서 바이러스에 의해 감염된 세포가 용해된 부분인 플라크의 개수를 측정하는 방식으로 그 농도를 판별할 수 있다.

하지만 배양법의 경우 배양에 걸리는 시간이 24시

간, 48시간 등으로 실시간 측정이 불가능하다는 단점이 있다. 일반적인 입자 측정장치인 SMPS, 광학 계수기 등을 이용하여 바이오에어로졸의 측정이 가능하지만 이 경우 미생물의 생존 여부를 판별할 방법이 없어 추가적인 측정이 필요하다. 자외선-가시광선 분광계 측법은 입자가 포함된 용액에 조사된 자외선과 가시광선이 빛이 흡수되는 정도를 판별하여 그 농도를 판별하는 것으로 세포, 핵산, 단백질 등을 측정하는 데 많이 사용되어왔다. 이 방식을 바이오에어로졸에 적용하기 위하여 임편저를 통해 부유 중인 바이오에어로졸을 증류수에 포집하여 그 농도를 판별하는 방식이 개발되어 3분 이내의 실시간 측정이 가능하다는 연구 결과가 발표되었다. 생물 발광을 이용하는 검정법의 기본 원리는 세포생존 유지에 필수적인 요소인 ATP(Adenosine Triphosphate)를 측정하는 것이다(그림 1). ATP는 건강한 세포에서는 정확하게 조절되지만, 세포의 죽음과 동시에 급격한 분해가 일어난다. ATP는 북아메리카 반딧불(Photinus pyralis)에서 발견된 루시페라아제(luciferase)라는 효소를 이용하여 측정할 수 있다. 루시페라아제는 ATP와 기질인 루시페린(luciferin) 사이의 반응에서 빛을 생성시킨다. 루시페린과 루시페라아제가 과량으로 존재할 경우 생성되는 빛의 양은 ATP의 양에 직접적으로 비례한다. 즉 존재하는 바이오입자의 양과 발광되는 빛과 연관하여 측정할 수 있다. 생물 발광 방식은 측정 방법이 간단하고 빠른 시간 안에 바이오 입자 유/무를 확인할 수 있어 다양한 분야에서 적용되고 있다.

살아 있는 바이오 물질은 다양한 세포내 생체 분자 반응 에너지를 가지고 있고, 이 생체분자들은 특별한

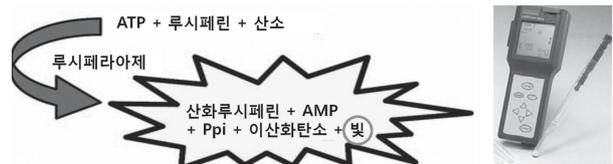


그림 1 생물 발광 방식 원리 및 상용 제품

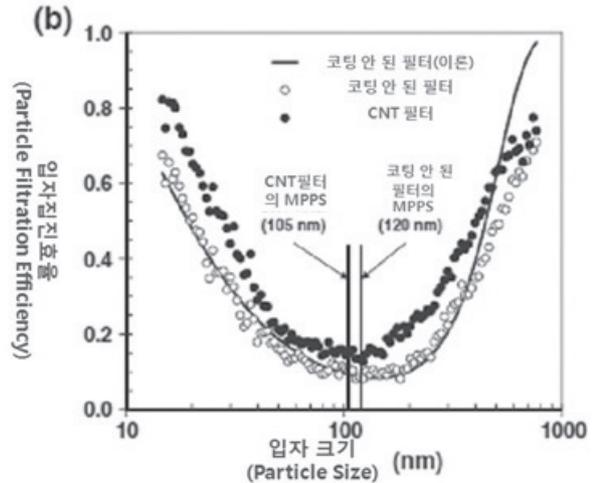
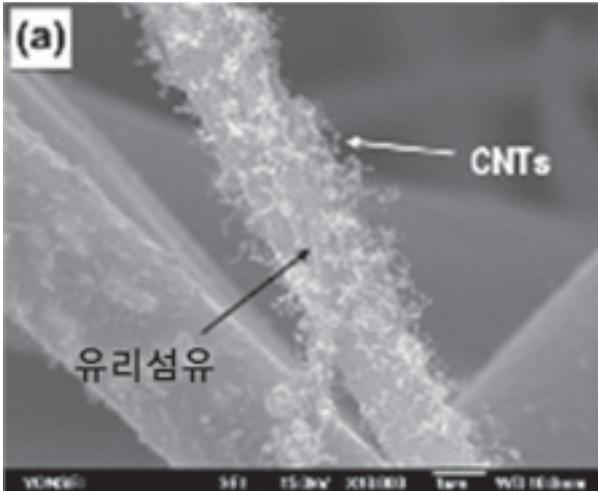


그림 2 (a) 필터에 성장한 CNT와 (b) CNT가 부착된 필터의 포집 효율

여기와 고유한 형광 파장 스펙트럼을 배출시킨다. 광학 방식은 형광 파장과 같이 빛의 파장을 이용하여 바이오 입자를 측정하게 된다. 발생하는 형광파장 범위는 430~580nm이며 이를 통하여 생체 분자의 생명성과 물질을 구별할 수 있다. 위 원리를 이용하여 개발된 바이오 입자 측정 장비로는 UV-APS(Ultraviolet Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer)가 있다. UV-APS는 샘플링되는 입자의 농도와 생명성을 실시간으로 측정이 가능하다. UV-APS는 유입된 입자는 색이 있는 레이저에 의해 입자의 크기와 농도, 입자의 생명성을 측정하게 된다. 위 두 가지 방식 이외에도 바이오 입자 측정 연구는 정확한 측정, 빠른 측정, 소형화를 고려하여 개선되어 연구되고 있다.

나노/바이오 에어로졸 입자 저감기술

입자상 물질을 제거하기 위해 많이 사용되어온 방법은 섬유필터방식과 전기집진방식의 두 가지 방법이다. 섬유필터방식은 필터를 통해 관성충돌, 차단, 확산, 중력침강 등의 포집 메커니즘에 의하여 입자를 제거하는 방식이다. 고효율의 헤파(HEPA: High

Efficiency Particulate Air filter), 울파(ULPA: Ultra-Low Penetration Air filter) 필터는 전자 및 반도체분야의 클린룸 등에 많이 사용되는데, 대용량을 처리하기 힘들고 압력손실이 커 소비 에너지가 증가하는 단점이 있다.

이러한 필터의 효율을 높이기 위하여 많은 기술들이 개발되어 왔는데, 최근 가장 많이 사용되고 있는 정전 필터는 일반 필터의 기계적인 메커니즘뿐만 아니라 필터가 락 정전기에 의하여 추가 전기력에 의해 입자가 포집되는 것이다. 추가적인 압력 강하 없이 포집 효율이 증가하기 때문에 많은 곳에서 이용되고 있다. 그리고 필터의 포집효율 향상을 위해 기존의 마이크로섬유 필터에 나노섬유를 추가하는 연구도 진행되고 있다. 나노 섬유의 경우 입자의 포집효율이 높지만 압력강하도 커 단독 사용 시 장시간 사용이 힘들고 포집된 입자를 털어낼 경우 낮은 내구성을 가진 나노섬유가 깨어질 가능성이 있으며 필터 교체주기가 빨라지는 등의 추가적인 비용이 발생한다. 그리하여 나노섬유를 전기방사법(electrospinning)을 이용하여 필터 표면을 코팅하거나 나노섬유 필터와 마이크로섬유 필터를 겹쳐 사용하거나, 탄소나노튜브를 마이크로섬유



그림 3 자외선을 이용한 항균 제품

필터에 성장시켜 추가적인 압력 강하 없이 필터의 포집효율이 증가하는 연구도 진행되었다.(그림 2)

전기집진방식은 코로나 방전을 통해 생성된 공기 이온이 입자를 하전시키고 반대 극성으로 대전되어 있는 집진판으로 하전된 입자를 포집시키는 기술이다. 낮은 압력강하, 대용량 처리의 수월성, 설치 후 추가적인 변동비가 들지 않는 장점이 있으나 헤파, 울파 필터에 비해 낮은 집진효율을 보이며 나노입자의 경우 하전량이 낮아 제거효율이 떨어지며 방전 형태에 따라 오존 및 질소산화물이 발생하는 문제가 있다. 이를 개선하기 위하여 전기집진 장치의 방전에 사용되는 와이어의 전극 온도를 높여 오존의 발생량을 줄이는 등 다양한 집진장치에 적용될 수 있도록 연구가 진행되고 있다.

바이오에어로졸 입자를 저감 및 제어하는 것을 크게 아울러 항균(antimicrobial)이라고 하며 항균은 정균(static effect)과 살균(sterilization)을 포함하는 의미이다. 정균이란 미생물의 성장과 대사가 저지되는 것을 의미하며 살균은 미생물에 물리적·화학적 자극을 가하여 이를 단시간 내에 멸살(滅殺)시키는 것을 의미한다. 즉, 살균은 미생물 자체를 죽이는 것을 의미하며 정균은 미생물 자체를 죽이는 것보다는 이들이 번식하지 못하도록 하는 것을 의미한다. 살균은 다시 병

원성이든 비병원성이든 모든 대상미생물을 완전히 사멸상태로 하는 멸균과 병원성 미생물이 병원성을 나타내지 못하도록 그 밀도를 낮추거나 거의 소멸 또는 사멸상태에 이르도록 하는 소독으로 구별한다. 따라서 항균 기술이란 미생물의 성장과 대사를 저지시키는 기술과 물리적·화학적 자극을 가하여 미생물을 멸살시키는 기술을 모두 의미하지만 일반적으로 멸균 또는 소독시키는 기술은 항균 기술이라 하지 않고 따로 살균 기술이라 언급하고 있다.

최근까지 다양한 항균 기술이 개발·진행 중에 있으며 대표적인 기술로는 자외선, 항균 필터, 이온 등이 있다. 자외선을 이용한 살균은 주로 220~300nm 파장의 빛을 이용하여 미생물을 항균한다(그림 3). 자외선을 이용한 항균 메커니즘은 미생물의 주요 구성성분인 단백질과 핵산에 자외선 에너지가 흡수되어 미생물의 활동을 못하게 하거나 파괴하는 것이다. 자외선 기술은 높은 항균 효율을 보이고 있으나 운행 시 오존이 발생하여 인체 피부나 눈에 장시간 노출되면 각결막염, 홍반이 발병 될 수 있다.

필터를 이용하여 바이오에어로졸 입자를 제거하는 기술은 유동 상태의 입자상 물질을 분리 및 제거하는 방식과 같다. 필터를 이용한 방식은 바이오에어로졸 입자와 일반 실내 공기 입자를 동시에 저감할 수 있는 장점이 있으나 오염물질에 직접적인 피해를 가하는 방식이 아니기 때문에 오히려 미생물들이 필터상에 번식하여 미생물성 휘발성유기화합물(MVOC: Microbial Volatile Organic Compound)과 같은 물질이 발생되며, 증식된 세균이나 곰팡이 등의 미생물이 필터에서 탈착되어 다시 공기 중으로 부유함으로써 2차적인 오염원이 되는 문제가 발생하게 된다. 이런 문제를 해결하기 위해 필터에 대한 항균 처리가 연구되어 왔다. 그림 4와 같이 항균 능력이 있는 은나노입자, 효소 등을 필터상에 부착시켜 항균 특성을 높이거나 바이오에어로졸 입자가 포집된 필터에 공기이온을 가

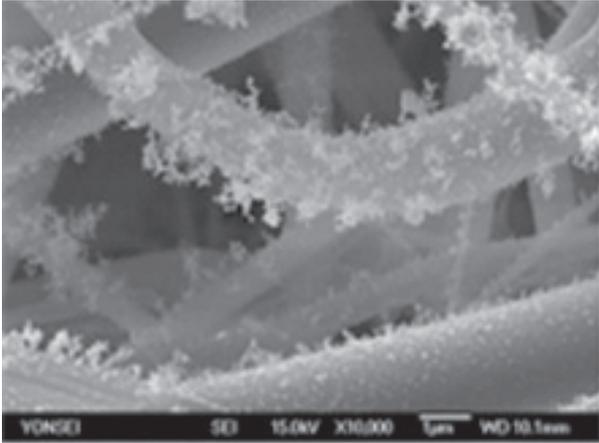


그림 4 은나노 입자가 코팅된 필터

하여 미생물의 생명성을 억제하는 등의 실험이 진행되고 있다.

코로나 방전에 의해 발생하는 이온은 실내 공기 환경에서 입자상 물질을 제거 하기위해 연구되어 왔다. 연구에 의하면 공기 이온은 수화물 형태로 존재하며 그 종류는 $O_2-(H_2O)_n$, $CO_2-(H_2O)_n$ 와 같은 양이온과 $(H_2O)+(H_2O)_n$, $O_2+(H_2O)_n$, $N_2+(H_2O)_n$, 등과 같은 음이온으로 구분할 수 있다. 이와 같은 이온을 이용한 항균 연구도 역시 최근에 활발하게 진행되고 있는데 음이온과 양이온을 바이오 입자에 충분히 노출시켜 주면 항균 효율이 90% 이상 높게 나타났으며, 오존 발생 농도와 소비전력이 낮게 발생된다. 국내외 기업에서도 공기 이온의 이 같은 특성을 이용해서 전자제품에 응용하기도 하였다. 일본의 샤프전자에서는 에어컨이나 공기청정기에 적용할 수 있는 이온 발생 장치를 연구 개발하여 특허화해 제품을 생산하였으며, 삼성전자에서도 마이크로 플라즈마를 방전시켜 얻은 하이드로페록시라디칼($HOO\cdot$)을 이용하여 유해성 바이



그림 5 이온 발생 장치 (좌) SPi, (우)NPI

오에어로졸에 있는 단백질 구조의 수소 결합을 파괴시켜 제거하는 기술인 SPi(Samsung super plasma ion)를 생산하고 있다(그림 5 좌). LG전자 역시 이온 발생 장치인 NPI(Nano Plasma ion)를 개발하여 NPI에서 발생하는 이온의 라디칼(OH)에 의해 실내 공기에 존재하는 바이오에어로졸 입자를 항균하는 장비를 생산하고 있다.(그림 5 우)

맺음말

소득이 증가하고 삶의 질 향상에 대한 욕구가 커짐에 따라 현대 사회에서는 웰빙(Well-being)에 관심을 갖게 되었고 이에 실내 공기질에 대한 관심도 커졌으며 그 시장 또한 커져가고 있다. 본 내용과 같이 실내 공기질을 개선하기 위해선 올바른 측정과 그에 알맞은 저감 기술이 필요하다. 효율적이고 완벽한 측정 및 저감 기술이 개발되기 위해서는 기계공학적인 설계와 다른 전문 분야가 연계된 연구가 진행되어야 할 것이다.